

## 4 結合 V D P 方程式を用いた 4 足歩行ロボットの歩容制御

著者	佐藤 僚太, 梶原 秀一, 青柳 学, 花島 直彦
雑誌名	計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集
巻	SI2016
号	第17回
ページ	1549-1552
発行年	2016-12
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/00009488">http://hdl.handle.net/10258/00009488</a>

## 4 結合 VDP 方程式を用いた 4 足歩行ロボットの歩容制御

○佐藤 僚太 (室蘭工大), 梶原 秀一 (室蘭工大), 青柳 学 (室蘭工大), 花島 直彦 (室蘭工大)

## Gait control for four-legged walking robot using four-coupled VDP equations

○Ryota SATOH (Muroran Inst. Tech.), Hidekazu KAJIWARA (Muroran Inst. Tech.)

Manabu AOYAGI (Muroran Inst. Tech.), and Naohiko HANAJIMA (Muroran Inst. Tech.)

Abstract : In our previous work, we proposed a walking pattern generation method of four-legged by using mutual entrainment of four-coupled van der Pol(VDP) equations. Our method can control forward and turning motion of the robot by the walking pattern used the periodic solutions of VDP equations which synchronize with arbitrary phase differences. In this study, we describe about the gait control system that the robot can avoid obstacles by walking pattern varied in response to the environment of the robot.

### 1. はじめに

非線形振動子である van der Pol(VDP) 方程式を相互に結合すると相互引き込み現象が起き様々なパターンで同期する。我々はこれまでに結合 VDP 方程式の同期パターンを制御する方法として、方程式間の結合状態を切り替えることにより目的とする同期パターンへ周期解を制御する方法を提案してきた<sup>1)</sup>。また 4 結合 VDP 方程式の同期パターンを利用して 4 足歩行ロボットの歩行パターンを生成する方法を提案してきた<sup>2)3)</sup>。本手法では各方程式の周期解間の位相を制御することで、ロボットの前進・後退・旋回などの歩行パターンを生成することが可能であった。本研究では、周囲の環境に応じて歩行パターンを変化させる歩容制御系を構築し、障害物を回避しながらロボットを目的地まで到達させることができるかどうかシミュレーションにより確認した結果について述べる。

### 2. 4 結合 VDP 方程式の同期パターン制御

#### 2.1 4 結合 VDP 方程式の同相モード誘導制御

本研究で歩行パターン生成のために使用している 4 結合 VDP 方程式を以下に示す。

$$\ddot{x}_i - \varepsilon(1 - \dot{x}_i^2)\dot{x}_i + \omega_0^2 x_i + K_m \left( \sum_{j=1}^4 x_j - x_i \right) + K_f \left( 3x_1 - \sum_{j=2}^4 x_j \right) = 0 \quad (1)$$

( $i = 1 \sim 4$ )

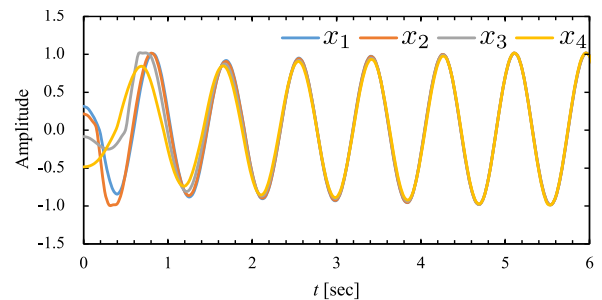


Fig. 1: In-phase synchronization pattern of four-coupled VDP equations

上式では固有振動数が等しい VDP 方程式が結合係数  $K_m$  によりすべて相互に結合されている。 $K_f$  の項はすべての周期解を同相で同期させるための同相モード誘導制御項であり、全ての解が同相で同期するとき 0 となる。 $K_f = 0$  のとき、式 (1) の定常状態の同期パターンは与えられた初期値に依存して変化してしまうが<sup>2)</sup>、 $K_f \neq 0$  とするとどのような初期値を与えても全ての周期解は必ず同相で同期する<sup>3)</sup>。

式 (1) の VDP 方程式の各パラメータを  $K_m = 5$ ,  $K_f = 5$ ,  $\omega_0 = 2\pi$ ,  $\varepsilon = 1$ , 各方程式に与える初期値を  $x_1(0) = 0.3$ ,  $x_2(0) = 0.2$ ,  $x_3(0) = -0.1$ ,  $x_4(0) = -0.5$ ,  $\dot{x}_i(0) = 0$  ( $i = 1 \sim 4$ ) としてシミュレーションした結果を Fig.1 に示す。図より、全ての周期解は同相で同期することがわかる。

#### 2.2 4 結合 VDP 方程式の位相制御

前節では 4 結合 VDP 方程式の周期解を同相で同期させる方法について述べた。次に各周期解間を任意の位相で同期させる方法について述べる。4 結合 VDP 方程式間の位

相を制御するために、Fig.2 に示すように各方程式間の周期解の位相を  $\phi_{ij} (i = 1 \sim 4, j = 1 \sim 4, i \neq j)$  シフトさせて相互に結合する場合を考える. このとき式 (1) の方程式は以下のように変換される.

$$\ddot{x}_i - \varepsilon(1 - \dot{x}_i^2)\dot{x}_i + \omega_0^2 x_i + K_m \left( \sum_{j=1}^4 X_{ji} - X_{ij} \right) + K_f \left( 3X_{i1} - \sum_{j=2}^4 X_{ij} \right) = 0 \quad (2)$$

( $i = 1 \sim 4$  ただし  $x_{ii} = x_i$ )

$$X_{ij} = x_i \cos \phi_{ij} - \frac{K'_{AGi}}{K_{AGi}} \dot{x}_i \sin \phi_{ij} \quad (3)$$

$$\phi_{ij} = -\phi_{ji} \quad (4)$$

$$\phi_{41} = 2\pi - \phi_{12} - \phi_{23} - \phi_{34} \quad (i = 1 \sim 4, j = 1 \sim 4, i \neq j) \quad (5)$$

ただし,  $K_{AGi}$ ,  $K'_{AGi}$  は  $x_i$ ,  $\dot{x}_i$  の振幅を 1 にするオートゲインコントロールのゲインであり, 以下のように解の振幅を半周期ごとに計測しその逆数をとったものである.

$$K_{AGi} = \frac{1}{\max|x_i|}, K'_{AGi} = \frac{1}{\max|\dot{x}_i|} \quad (i = 1 \sim 4) \quad (6)$$

式 (3) に示すように  $X_{ij}$  は  $x_i$  と位相  $\phi_{ij}$  だけずれた周期解である. Fig.2 において  $\phi_{12}$ ,  $\phi_{23}$ ,  $\phi_{34}$  は任意に決めることができ, それ以外の位相は式 (4)(5) から求めることができる.

Fig.3 に時間  $t < 6s$  で  $\phi_{12} = \phi_{23} = \phi_{34} = 0$  とし,  $t \geq 6$  で  $\phi_{12} = \phi_{23} = \phi_{34} = \pi/2$  としたときのシミュレーション結果を示す. なお, 各方程式のパラメータは Fig.1 の場合と同じであり, 各方程式の初期値は  $x_1(0) = 0.3$ ,  $x_2(0) = -0.3$ ,  $x_3(0) = 0.1$ ,  $x_4(0) = -0.2$ ,  $\dot{x}_i(0) = 0 (i = 1 \sim 4)$  とした. 図より, 指定した位相で周期解を同期できることがわかる.

### 3. 4 足歩行ロボットの歩行パターン生成

次に, 式 (2) の周期解を利用して 4 足歩行ロボットの歩行パターンを生成する方法について述べる. 制御対象として想定した 4 足歩行ロボットを Fig.4 に示す. このロボットは各脚の関節にそれぞれ 2 個ずつサーボモータが内蔵されている. Fig.5 に示すように VDP 方程式の周期解が各モータの指令値として与えられる. 第 1 関節のモータ

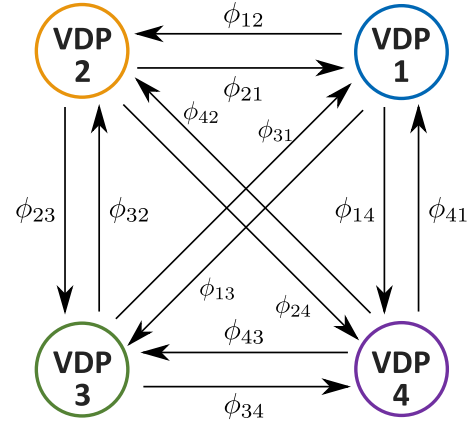


Fig. 2: Phase relations between four-coupled VDP equations

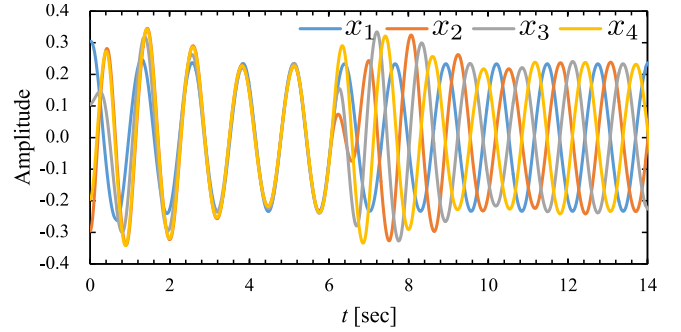


Fig. 3: Synchronization pattern controlled by phase control system

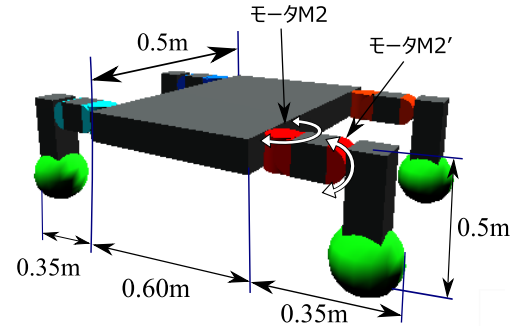


Fig. 4: Four-legged robot

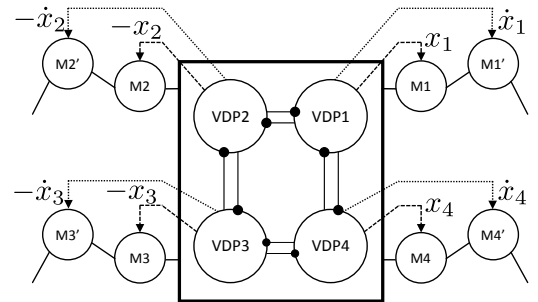


Fig. 5: Signal flow

M1 ～ M4 には  $x_1 \sim x_4$ , 第 2 関節のモータ M1' ～ M4' には  $\dot{x}_1 \sim \dot{x}_4$  を指令値として与えることで各脚の関節間では位相差が常に  $\pi/2$  となり, 各脚先は円軌道を描く. この運動によって足先は地面に接地したり離れたりする. なお, 足先が円運動すると, 足先が地面に接地した際にロボットの本体を押し上げてしまうため, 実際には足先が接地している間は第 2 関節の角度を接地した際の角度で固定し変化させないようにしている.

周期解間の位相によりロボットの歩行運動を制御できるかどうかシミュレーションにより確認した結果を Fig.6, Fig.7 に示す. Fig.7 (b) に示すように  $x_1$  と  $x_2$  間の位相を  $\Delta\phi = x_1 - x_2$  としたとき,  $\Delta\phi = 0$ ,  $x_3 - x_4$  間の位相を  $\phi_{34} = 0$ ,  $x_2 - x_3$  および  $x_4 - x_1$  間の位相を  $\phi_{23} = \phi_{41} = \pi$  と設定したとき Fig.6 よりロボットは前進動作をすることがわかる.

また, Fig.7 (a)(c) に示すように,  $\Delta\phi$  を  $0 < \Delta\phi < \pi$  の範囲で変化させると, Fig.6 よりロボットは左旋回または右旋回することがわかる.

次章では,  $\Delta\phi$  を周囲の環境に応じて変化させることにより歩容を変化させる歩容制御系を構築し, 障害物回避動作が実現可能かどうか確認した結果について述べる.

#### 4. ポテンシャル法による障害物回避

本研究では周囲の環境に応じて歩容を変化させるために, ポテンシャル法を応用する. ここでロボットが到達するゴールや障害物のポテンシャル関数として以下のようなレナードジョーンズ型ポテンシャル関数を考える.

$$U(r) = -\frac{A}{r^n} + \frac{B}{r^m} \quad (7)$$

上式で  $r$  はロボットと対象物間の距離であり,  $A, B, m, n$  はポテンシャル場の性質を決めるパラメータである. ロボットが対象物から受ける力の大きさは上式を  $r$  で微分することにより以下となる.

$$F(r) = \frac{dU(r)}{dr} \quad (8)$$

$$= -\frac{nA}{r^{n+1}} + \frac{mB}{r^{m+1}} \quad (9)$$

$$= -\frac{A'}{r^{n'}} + \frac{B'}{r^{m'}} \quad (10)$$

上式を用いてロボットが対象物から受ける力を以下のように表すことを考える.

$$\mathbf{F}_G = (F_G(r_G) \cos \theta_G, F_G(r_G) \sin \theta_G) \quad (11)$$

$$\mathbf{F}_O = (F_O(r_O) \cos \theta_O, F_O(r_O) \sin \theta_O) \quad (12)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_O \quad (13)$$

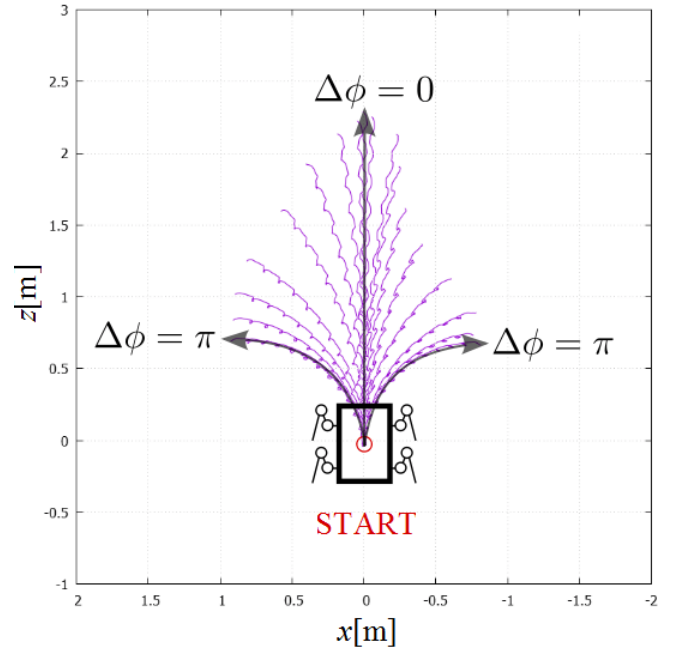


Fig. 6: Walking trajectories of Four-legged robot

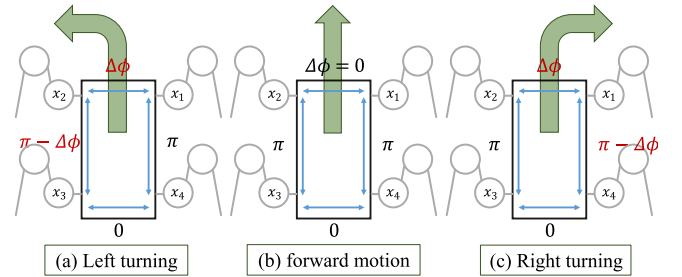


Fig. 7: Relationship between the phase difference and the walking pattern

上式において  $F_G, F_O$  はゴールと障害物から受ける力,  $r_G, r_O$  はロボット対象物との距離,  $\theta_G, \theta_O$  はロボットから見た対象物の方向である.  $\mathbf{F}$  はロボットが受ける力の総和である. ロボットの歩容を制御する  $\Delta\phi$  は式 (13) を利用して以下のように設定する.

$$\Delta\phi = k \arg(\mathbf{F}) \quad (k > 0) \quad (14)$$

ゴールの座標を  $(-2, 4)$  とし, 高さ 5m 半径 0.5m の円柱が座標  $(0, 3)$  に障害物として設置されているとき, ロボットがゴールまで到達するかどうかシミュレーションした結果を Fig.8 に示す. ロボットの初期座標は  $(0, 0)$  で, ここに Fig.4 に示したロボットが  $x$  軸の正の方向を向いてスタートする. なお, シミュレーションでは, ゴールとロボットの位置は何らかの方法によりわかっているものとし, ロボットと障害物間の距離とロボットから見た障害物の方向はロボットに搭載されたレーザーレンジファインダにより測定可能であるとした. ゴールから受ける引力のパラメー

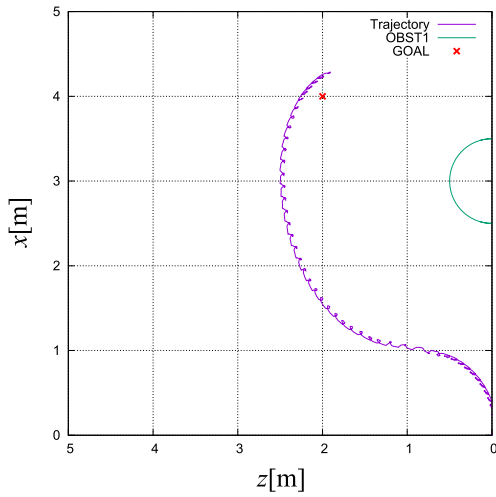


Fig. 8: Walking trajectory(Target position: left)

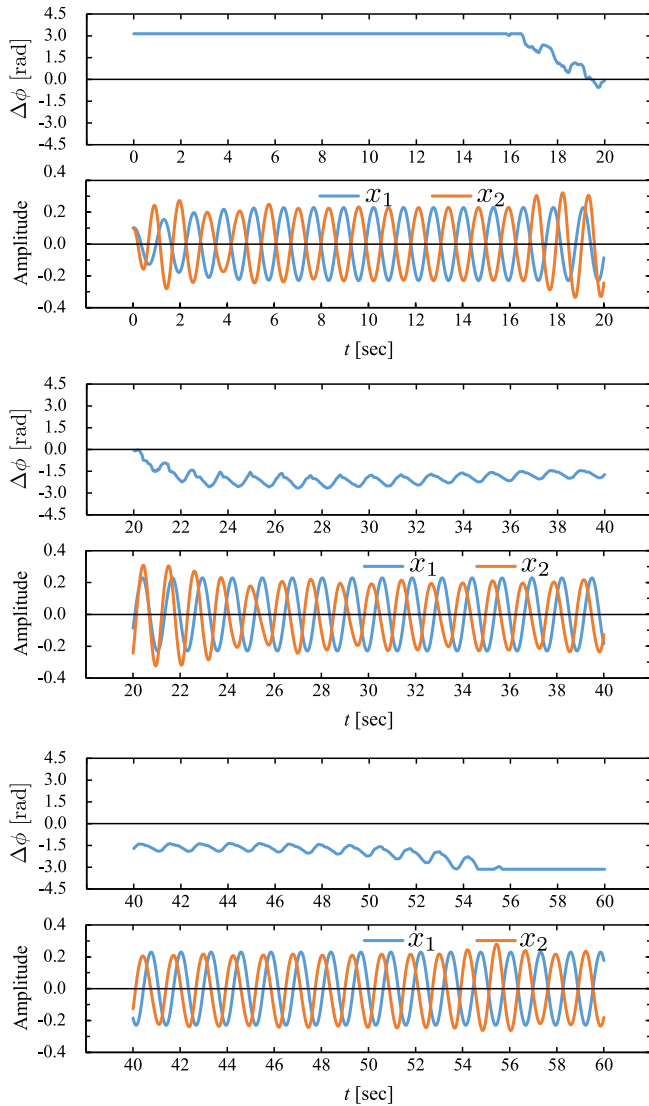


Fig. 9: VDP solutions and  $\Delta\phi$  during walking

タは式 (10) で  $A' = 100$ ,  $B' = 0$ ,  $n' = 5$ ,  $m' = 5$  とし, 障害物から受ける斥力のパラメータは  $A' = 0$ ,  $B' = 50$ ,  $n' = 5$ ,  $m' = 5$  とした. また, 式 (14) のパラメータ

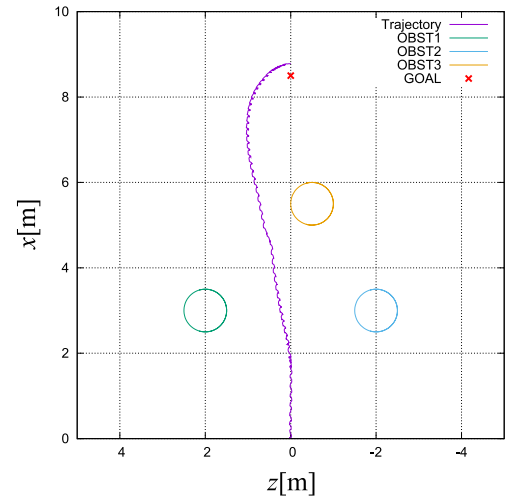


Fig. 10: Walking trajectory(Three obstacles)

$k$  は 4.0 とした. 図よりロボットはスタート地点からゴール地点付近まで移動できることがわかる. Fig.9 に  $\Delta\phi$  がどのように変化したか, および  $x_1 - x_2$  間の位相差がどのように変化したか調べた結果を示す. 図より,  $\Delta\phi$  の変化に応じて  $x_1 - x_2$  間の位相も変化していることがわかる. また Fig.10 のように障害物を増やした場合でも周期解の位相が変化し, 障害物を回避出来ていることがわかる.

## 5. おわりに

本研究では 4 結合 VDP 方程式の周期解を利用して 4 足歩行ロボットの歩容パターン生成および周囲の環境に応じて歩容を制御する方法について述べた. 今後はさらに, 周期の環境に合わせてロボットの歩行速度を制御する制御系を検討したいと考えている. また, 実機による検証も今後の課題である.

## 参考文献

- 1) 梶原 秀一, 花島 直彦, 青柳 学: 引き込み現象を利用した結合 van der Pol 方程式の同期パターン制御—2 または 3 結合 van der Pol 方程式の場合—, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J98-A, No.6, 406/416(2015)
- 2) 佐藤 僚太, 梶原 秀一, 青柳 学, 花島 直彦: 非線形振動子を用いた多足歩行ロボットの歩行パターン生成, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2015 講演論文集, 1194/1195(2015).
- 3) 佐藤 僚太, 梶原 秀一, 青柳 学, 花島 直彦: 4 結合 VDP 方程式を用いた 4 足歩行ロボットの歩行パターン生成, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1A2-06b4(2016)
- 4) 出村公成: 簡単!実践!ロボットシミュレーション - Open Dynamics Engine によるロボットプログラミング, pp.138-139(2007)